

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-027507

(43)Date of publication of application : 25.01.2002

(51)Int.Cl.

H04N 17/00

G01B 11/00

G01C 3/06

(21)Application number : 2000-212381

(71)Applicant : SONY CORP

(22)Date of filing : 13.07.2000

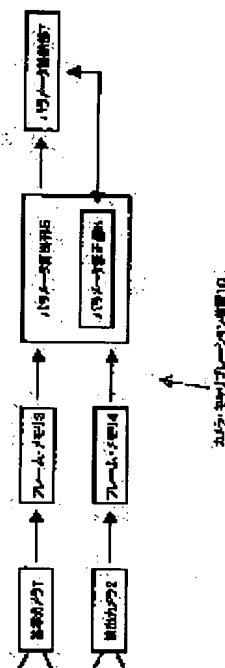
(72)Inventor : IWAI YOSHIAKI  
ASHIGAHARA TAKAYUKI

## (54) CAMERA CALIBRATION DEVICE AND METHOD, AND STORAGE MEDIUM

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To perform simple camera calibration in the stereo method.

SOLUTION: The distortion parameter of each camera is estimated by an image that is picked up at least three viewpoints without any spatial position restraint by reference and detection cameras, and at the same time each projection conversion matrix for projecting each picked up image to a virtual plane is calculated. Then, the inner parameter of the reference camera is calculated based on the projection conversion matrix for each picked up image of the reference camera. Then, based on the inner parameter and each picked up image of the reference camera, the image of a plane position that has been picked up is estimated, and a projection matrix to the detection camera is calculated based on the parameter of the plane position and each picked up image of the detection camera.



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-27507

(P2002-27507A)

(43) 公開日 平成14年1月25日 (2002.1.25)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード* (参考)
H 0 4 N 17/00		H 0 4 N 17/00	K 2 F 0 6 5
G 0 1 B 11/00		G 0 1 B 11/00	H 2 F 1 1 2
G 0 1 C 3/06		G 0 1 C 3/06	V 5 C 0 6 1

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2000-212381(P2000-212381)

(22) 出願日 平成12年7月13日 (2000.7.13)

(71) 出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川6丁目7番35号

(72) 発明者 岩井 嘉昭

東京都品川区東五反田1丁目14番10号 株式会社ソニー木原研究所内

(72) 発明者 芦ヶ原 隆之

東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内

(74) 代理人 100101801

弁理士 山田 英治 (外2名)

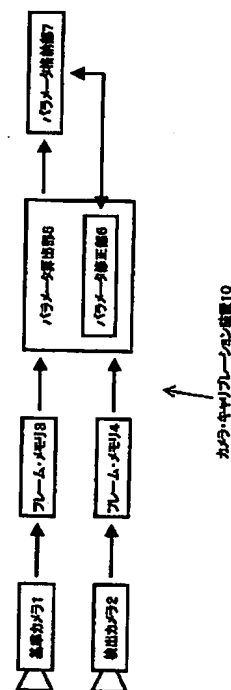
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 カメラ・キャリブレーション装置及び方法、並びに、記憶媒体

(57) 【要約】

【課題】 ステレオ法における簡単なカメラ・キャリブレーションを行なう。

【解決手段】 基準カメラと検出カメラによって空間的な位置拘束のない3以上の視点で撮像した画像を用いて各カメラの歪みパラメータを推定するとともに、各撮像画像を仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する。次いで、基準カメラの各撮像画像毎の射影変換行列を基に基準カメラの内部パラメータを算出する。次いで、基準カメラの内部パラメータ及び各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定して、この平面位置のパラメータ及び検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】基準カメラと検出カメラで構成されるステレオ・システムのキャリブレーションを行うカメラ・キャリブレーション装置であって、  
既知パターンが描かれた平面を前記基準カメラ及び前記検出カメラによって空間的な位置拘束のない 3 以上の視点で撮像した画像を保持する画像保持手段と、  
前記画像保持手段に保持された各撮像画像を基に、ステレオ・システムによる距離計測に必要なパラメータを算出するパラメータ算出手段と、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項 2】前記パラメータ算出手段は、  
各撮像画像を用いて前記基準カメラ及び前記検出カメラの歪みパラメータを推定する第 1 の手段と、  
各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第 2 の手段と、  
前記第 2 の手段により求められた前記基準カメラの各撮像画像の射影変換行列を基に前記基準カメラの内部パラメータを算出する第 3 の手段と、  
前記第 3 の手段により算出された前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第 4 の手段と、  
前記第 4 の手段により推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第 5 の手段と、を具備することを特徴とする請求項 1 に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項 3】さらに、前記画像保持手段に保持された前記基準カメラ及び前記検出カメラの各 2 以上の撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化するパラメータ修正手段を備えることを特徴とする請求項 1 に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項 4】前記パラメータ修正手段は、  
各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第 6 の手段と、  
前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第 7 の手段と、  
前記第 7 の手段により推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第 8 の手段と、  
各撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化する第 9 の手段と、を備えることを特徴とする請求項 3 に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項 5】各撮像画像を所定の合成画像に合わせ込むことによって歪みパラメータ及び／又は射影変換行列を算出することを特徴とする請求項 1 に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項 6】基準カメラと検出カメラで構成されるステレオ・システムのキャリブレーションを既知パターンが描かれた平面を各カメラで空間的な位置拘束のない 3 以上の視点で撮像した画像を用いて行うカメラ・キャリブレーション方法であって、  
各撮像画像を用いて前記基準カメラ及び前記検出カメラの歪みパラメータを推定する第 1 のステップと、  
各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第 2 のステップと、

10 前記第 2 のステップにより求められた前記基準カメラの各撮像画像の射影変換行列を基に前記基準カメラの内部パラメータを算出する第 3 のステップと、  
前記第 3 のステップにより算出された前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第 4 のステップと、  
前記第 4 のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第 5 のステップと、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項 7】さらに、前記基準カメラ及び前記検出カメラの各 2 以上の撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化するパラメータ修正ステップを備えることを特徴とする請求項 6 に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項 8】前記パラメータ修正ステップは、  
各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第 6 のステップと、  
前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第 7 のステップと、

30 前記第 7 のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第 8 のステップと、  
各撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化する第 9 のステップと、を備えることを特徴とする請求項 7 に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項 9】各撮像画像を所定の合成画像に合わせ込むことによって歪みパラメータ及び／又は射影変換行列を算出することを特徴とする請求項 6 に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項 10】基準カメラと検出カメラで構成されるステレオ・システムのキャリブレーションを既知パターンが描かれた平面を各カメラで空間的な位置拘束のない 3 以上の視点で撮像した画像を用いて行うカメラ・キャリブレーション処理をコンピュータ・システム上で実行するように記述されたコンピュータ・ソフトウェアをコンピュータ可読形式で物理的に格納した記憶媒体であって、前記コンピュータ・ソフトウェアは、

各撮像画像を用いて前記基準カメラ及び前記検出カメラの歪みパラメータを推定する第1のステップと、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第2のステップと、前記第2のステップにより求められた前記基準カメラの各撮像画像の射影変換行列を基に前記基準カメラの内部パラメータを算出する第3のステップと、前記第3のステップにより算出された前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第4のステップと、前記第4のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第5のステップと、を具備することを特徴とする記憶媒体。

【請求項11】前記コンピュータ・ソフトウェアは、さらに、前記基準カメラ及び前記検出カメラの各2以上の撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化するパラメータ修正ステップを備えることを特徴とする請求項10に記載の記憶媒体。

【請求項12】前記パラメータ修正ステップは、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第6のステップと、前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第7のステップと、前記第7のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第8のステップと、各撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化する第9のステップと、を備えることを特徴とする請求項11に記載の記憶媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーション方法及び装置に係り、特に、対象物を撮像して電子的な画像データを出力するタイプのカメラに対してパラメータ算出を行うカメラ・キャリブレーション方法及び装置に関する。

【0002】更に詳しくは、本発明は、ステレオ法のカメラ・キャリブレーションにおいて、空間的な位置拘束のない任意の平面を用いて、距離計測に必要なパラメータを算出するためのカメラ・キャリブレーション方法及び装置に関する。

【0003】

【従来の技術】実在するカメラの多くは、ピンホールカメラ・モデルによる中心投影を行う。中心投影とは、投影中心Cと3次元物体表面の点Mとを結ぶ直線（「視線」とも言う）とカメラの投影スクリーンとの交点に物体表面の点Mの色濃度値を配置していくことで、投影画

像を形成することができる。中心投影では、同じ大きさの物体であっても、カメラの投影中心Cに近づくにつれて大きな像として投影され、逆に、投影中心Cから遠ざかるにつれて小さく投影される性質を持つ。

【0004】また、撮像対象が平面である場合、その正面に対して斜め方向から撮像した画像は、正面に正対した位置から撮像した画像を射影変換した射影画像となることは、幾何光学的に明らかである。正面画像を射影変換行列Hによって射影変換することで射影画像が得られるということは、画像処理の技術分野において広く知られている。例えば、正面画像がデジタル・カメラにより捕捉された電子的な画像データであれば、捕捉した正面画像を射影変換することによって、任意の方向（視線）から撮像したに等しい射影画像を、比較的高速且つ容易に計算して求めることができる。例えば、金谷健一著の「画像理解」（森北出版、1990）には、元の画像を射影変換行列によって別の角度から見える画像に変換できる点が記載されている。撮像画像の射影変換処理は、例えば、コンピュータ資源を用いて高速に行うことができる。

【0005】射影変換に関する幾何光学的な性質は、例えば、「ステレオ法」に基づく対象物の距離測定方法にも適用することができる。ここで言うステレオ法とは、所定の位置関係を持つ複数の視点（投影中心）から撮像した画像を用いて、シーンすなわち撮像画像中の各点と投影中心との距離を、いわゆる「三角測量」の原理により測定する方法のことである。

【0006】本明細書中では、説明の便宜上、2つの視点すなわち2個のカメラのみを用いてステレオ法を行うこととする。1つのカメラは基準カメラとして使用され、正面と正対した位置から対象物を撮像して、基準画像を出力する。また、他方のカメラは検出カメラとして使用され、斜め方向から対象物を撮像して、検出画像を出力する。図7は、撮像平面に対する基準カメラと検出カメラの配置を模式的に示しており、また、図8には、略正方形のパターンを基準カメラと検出カメラの各々によって撮像した場合の基準画像と検出画像を模式的に示している。

【0007】図7に示すように、基準カメラの撮像画像では、撮像対象となる平面上の点Mと基準カメラの投影中心C<sub>0</sub>とを結ぶ直線と基準カメラの投影スクリーンS<sub>0</sub>との交点mに点Mが観察される。点Mと基準カメラの投影中心C<sub>0</sub>とを結ぶ直線は、基準カメラの視線である。また、検出カメラの撮像画像では、点Mと検出カメラの投影中心C<sub>d</sub>とを結ぶ直線と検出カメラの投影スクリーンS<sub>d</sub>との交点m'に点Mが観察される。点Mと検出カメラの投影中心C<sub>d</sub>とを結ぶ直線は、検出カメラの視線である。

【0008】基準カメラの視線は、検出カメラの投影スクリーン上では直線として観察されるが、この直線のこ

とを「エビポーラ・ライン」と呼ぶ。

【0009】また、図7及び図8に示す例では、略正方形のパターンに正対する基準カメラで撮像した撮像画像は正方形となるのに対し、このパターンを斜視する検出カメラで撮像した画像は、視点からの距離が長い辺が縮小される結果として、台形状ととして現れる。これは、同じ大きさの物体であっても、カメラの投影中心Cに近づくにつれて大きな像として投影され、逆に、投影中心Cから遠ざかるにつれ小さく投影されるという、中心投影の基本的性質に依拠する。

【0010】上述したように、撮像対象が平面である場合、検出カメラの撮像画像は、基準カメラの撮像画像を射影変換した画像である。すなわち、基準カメラの撮像画像中の点 $m(x_b, y_b)$ と、これに対応する検出カメラの撮像画像中の点 $m'(x_d, y_d)$ の間には、以下の式が成立する。但し、同式中の $H$ は $3 \times 3$ 射影変換行列である。

【0011】

【数1】

$$m' = H \cdot m$$

【0012】射影変換行列 $H$ は、カメラの内部パラメータ及び外部パラメータ、平面の方程式を暗黙的に含んだ行列であり、また、スケール因子に自由度が残るので、8自由度を有する。なお、金谷健一著の「画像理解」

(森北出版、1990)には、基準画像と参照画像間において、射影変換により互いの対応点を求めることができるということが記載されている。

【0013】基準カメラの視線は、検出カメラのカメラの投影スクリーン上ではエビポーラ・ラインと呼ばれる直線として現れる(前述及び図7を参照のこと)。基準カメラの視線上に存在する点 $M$ は、点 $M$ の奥行き、すなわち基準カメラとの距離の大小に拘らず、基準カメラの投影スクリーン上では同じ観察点 $m$ 上に現れる。これに対し、検出カメラの投影スクリーン上における点 $M$ の観察点 $m'$ は、エビポーラ・ライン上で基準カメラと観察点 $M$ との距離の大小に応じた位置に現れる。

【0014】図9には、エビポーラ・ラインと、検出カメラの投影スクリーン上における観察点 $m'$ の様子を図解している。同図に示すように、点 $M$ の位置が $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ へと変化するに従って、参照画像中の観察点は $m'_1$ 、 $m'_2$ 、 $m'_3$ へとシフトする。言い換えれば、エビポーラ・ライン上の位置が観察点 $M$ の奥行きに相当する訳である。

【0015】以上の幾何光学的性質を利用して、基準カメラの観察点 $m$ に対応する観察点 $m'$ をエビポーラ・ライン上で探索することにより、基準カメラから点 $P$ までの距離を同定することができる。これが「ステレオ法」の基本的原理である。

【0016】しかしながら、撮像対象を実写した正面画

像を基にして斜視画像を生成したり、あるいは、ステレオ法に基づいて複数台のカメラによる複数の画像から物体の距離を計測することは、カメラが持つ撮像光学系が理論と完全に一致する特性を持っていることを前提としている。このため、実写により取得した画像に対して所定の補正を施す必要がある。例えば、カメラのレンズは一般に歪みパラメータを有し、観察点は理論上の点から変位した位置に結像される。したがって、カメラ特有のパラメータを算出し、射影変換に際してこのパラメータに従った画像データの補正を行わなければ、正面画像から正確な射影画像を得ることができず、また、ステレオ法により正確な奥行き計測を行うことができない。

【0017】カメラが持つパラメータは、レンズの歪みパラメータの他、カメラ特性を表す内部パラメータ、カメラの3次元位置を示す外部パラメータに区分される。カメラのパラメータを算出する方法のことを、一般に、「カメラ・キャリブレーション」と呼ぶ。カメラ・キャリブレーションのための手法は、従来から数多く提案されているが、未だ確立されたものがないのが現状である。一般には、キャリブレーションに用いるデータの拘束などのために専用の器具などを利用する必要もあり、非常に煩雑な処理となってしまう。

【0018】最も一般的なカメラ・キャリブレーション方法は、3次元空間中の位置が既知である複数の参照点からなる校正パターンを撮像して、全てのカメラ・パラメータ、すなわち内部パラメータ、外部パラメータ、歪みパラメータを同時に算出する方法である。例えば、Roger Y. Tsai著の論文“An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision”

(1986, IEEE)には、このようなカメラ・キャリブレーション手法について記載している。しかしながら、Tsaiの方法を実行するためには、正確な参照点が描かれた校正パターンを用意する必要がある。さらに、参照点を正確に位置決めする機構も必要となってしまう。

【0019】このようなデータ拘束を軽減すべく、最近では、位置拘束のない任意平面を用いたカメラ・キャリブレーション方法も幾つか提案されている。

【0020】例えば、Zhengyou Zhang著の論文“A Flexible New Technique for Camera Calibration”, Microsoft Research Technical Report, 1999 (<http://www.research.microsoft.com/~zhang/>)には、カメラの内部パラメータを算出する方法について記載されているが、ステレオ法に関するパラメータを提供するには至っていない。

【0021】以上を略言すれば、平面上の既知パターンを異なる方向からカメラで撮像するだけで、平面の位置に関する拘束のない、ステレオ・システムにおけるカメラ・キャリブレーションを簡単に行なえる手順が望まれている訳である。

【0022】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、カメラの特性を表すパラメータを算出することができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することにある。

【0023】本発明の更なる目的は、平面上の既知パターンを異なる方向からカメラで撮像するだけで、平面の位置に関する拘束のない、ステレオ・システムにおけるカメラ・キャリブレーションを簡単に行なうことができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することにある。

【0024】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記課題を参酌してなされたものであり、その第1の側面は、基準カメラと検出カメラで構成されるステレオ・システムのキャリブレーションを行うカメラ・キャリブレーション装置であって、既知パターンが描かれた平面を前記基準カメラ及び前記検出カメラによって空間的な位置拘束のない3以上の視点で撮像した画像を保持する画像保持手段と、前記画像保持手段に保持された各撮像画像を基に、ステレオ・システムによる距離計測に必要なパラメータを算出するパラメータ算出手段と、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション装置である。

【0025】ここで、前記パラメータ算出手段は、各撮像画像を用いて前記基準カメラ及び前記検出カメラの歪みパラメータを推定する第1の手段と、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第2の手段と、前記第2の手段により求められた前記基準カメラの各撮像画像の射影変換行列を基に前記基準カメラの内部パラメータを算出する第3の手段と、前記第3の手段により算出された前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第4の手段と、前記第4の手段により推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第5の手段と、で構成することができる。

【0026】また、該カメラ・キャリブレーション装置は、前記画像保持手段に保持された前記基準カメラ及び前記検出カメラの各2以上の撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化するパラメータ修正手段をさらに備えていてもよい。

【0027】また、前記パラメータ修正手段は、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第6の手段と、前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第7の手段と、前記第7の手段により推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第8の手段と、各撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化する第9の手段と、で構成することができる。

【0028】また、各撮像画像を所定の合成画像に合わせ込むこと（Image Registration）によって歪みパラメータ及び／又は射影変換行列を算出するようにしてもよい。画像合わせ込みによれば、例えばパターンが撮像された位置が局所的であっても、比較的安定に歪みパラメータを推定することができる。

【0029】また、本発明の第2の側面は、基準カメラと検出カメラで構成されるステレオ・システムのキャリブレーションを既知パターンが描かれた平面を空間的な位置拘束のない3以上の視点で各カメラで撮像した画像を用いて行うカメラ・キャリブレーション方法であって、各撮像画像を用いて前記基準カメラ及び前記検出カメラの歪みパラメータを推定する第1のステップと、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第2のステップと、前記第2のステップにより求められた前記基準カメラの各撮像画像の射影変換行列を基に前記基準カメラの内部パラメータを算出する第3のステップと、前記第3のステップにより算出された前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第4のステップと、前記第4のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第5のステップと、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション方法である。

【0030】該カメラ・キャリブレーション方法は、前記基準カメラ及び前記検出カメラの各2以上の撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化するパラメータ修正ステップをさらに備えていてもよい。

【0031】また、前記パラメータ修正ステップは、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第6のステップと、前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第7のステップと、前記第7のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第8のステップと、各撮像画像を基に、平面位置のパラメータ、前記検出カメラへの投影行列を最適化する第9のステップと、で構成することができる。

【0032】また、本発明の第3の側面は、基準カメラと検出カメラで構成されるステレオ・システムのキャリブレーションを既知パターンが描かれた平面を空間的な位置拘束のない3以上の視点で各カメラで撮像した画像を用いて行うカメラ・キャリブレーション処理をコンピュータ・システム上で実行するように記述されたコンピュータ・ソフトウェアをコンピュータ可読形式で物理的に格納した記憶媒体であって、前記コンピュータ・ソフトウェアは、各撮像画像を用いて前記基準カメラ及び前

記検出カメラの歪みパラメータを推定する第1のステップと、各撮像画像を所定の仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する第2のステップと、前記第2のステップにより求められた前記基準カメラの各撮像画像の射影変換行列を基に前記基準カメラの内部パラメータを算出する第3のステップと、前記第3のステップにより算出された前記基準カメラの内部パラメータ及び前記基準カメラの各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定する第4のステップと、前記第4のステップにより推定された平面位置のパラメータ及び前記検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出する第5のステップと、を具備することを特徴とする記憶媒体である。

【0033】本発明の第3の側面に係る記憶媒体は、例えば、様々なプログラム・コードを実行可能な汎用性のコンピュータ・システムに対して、コンピュータ・ソフトウェアをコンピュータ可読な形式で物理的に提供する媒体である。このような媒体は、例えば、CD (Compact Disc) やFD (Floppy Disc)、MO (Magnetic Optical disc) などの着脱自在で可搬性の記憶媒体である。あるいは、ネットワーク（ネットワークは無線、有線の区別を問わない）などの伝送媒体などを経由してコンピュータ・ソフトウェアを特定のコンピュータ・システムにコンピュータ可読形式で提供することも技術的に可能である。

【0034】このような記憶媒体は、コンピュータ・システム上で所定のコンピュータ・ソフトウェアの機能を実現するための、コンピュータ・ソフトウェアと記憶媒体との構造上又は機能上の協働的關係を定義したものである。換言すれば、本発明の第3の側面に係る記憶媒体を介して所定のコンピュータ・ソフトウェアをコンピュータ・システムにインストールすることによって、コンピュータ・システム上では協働的作用が発揮され、本発明の第1及び第2の各側面に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法と同様の作用効果を得ることができる。

【0035】

【作用】本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法では、基準カメラと検出カメラによって空間的な位置拘束のない3以上の視点で撮像した画像を用いて各カメラの歪みパラメータを推定するとともに、各撮像画像を仮想平面へ射影する各射影変換行列を算出する。次いで、基準カメラの各撮像画像毎の射影変換行列を基に基準カメラの内部パラメータを算出する。そして、基準カメラの内部パラメータ及び各撮像画像を基に、撮像した平面位置を推定して、この平面位置のパラメータ及び検出カメラの各撮像画像を基に、前記検出カメラへの投影行列を算出することができる。

【0036】本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法によれば、空間的な位置拘束のない任意平

面を用いて、ステレオ法における簡単なカメラ・キャリブレーションを行なうことができる。したがって、撮像平面の位置関係に制約がないので、専用の器具を必要としない。

【0037】すなわち、平面上の既知パターンを異なる方向からカメラで撮像するだけでよく、平面の位置に関する拘束はない。

【0038】また、パターンは既知である必要はあるが専用の器具を用意したものである必要がないため、例えば、レーザ・プリンタ等でパターンを出力した紙を壁やプレートに貼り付けて行うことができる。

【0039】また、撮像の際はパターンの描かれた（貼られた）平面（プレートなど）を動かすか、あるいはカメラを動かして撮像して、3枚の平面撮像画像を取得するだけでよいので、撮像対象（データ）に関する大きな制約がなく、キャリブレーションを簡単に行うことが可能となる。

【0040】本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施例や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

【0041】

【発明の実施の形態】本発明の実施の形態について説明するに先立ち、本明細書で用いるカメラ・パラメータ、並びに、これらのパラメータから距離計測を行なう方法について説明しておく。

【0042】以下では、画像上の点を、

【0043】

【数2】

$$\mathbf{m} = [u, v]^T$$

【0044】とし、また、空間中の点を

【0045】

【数3】

$$\mathbf{M} = [x, y, z]^T$$

【0046】とし、各点の斉次座標系での記述をそれぞれ以下のようにおく。

【0047】

【数4】

$$\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$$

$$\tilde{\mathbf{M}} = [x, y, z, 1]^T$$

【0048】このような場合、空間中の点Mと画像上の点mの関係は以下に示す式で与えられる。

【0049】

【数5】

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}} &= \mathbf{A} \cdot [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \cdot \tilde{\mathbf{M}} \\ &= \mathbf{P} \cdot \tilde{\mathbf{M}} \end{aligned} \quad (1)$$

【0050】ここで、 $s$  はスケール因子であり、行列  $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$  は外部パラメータと呼ばれるもので、カメラの空間内での位置を表す。また、 $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  は、それぞれ画像の回転及び並進行列を表す。また、行列  $\mathbf{A}$  は、カメラの内部パラメータと呼ばれるもので、以下に示す式で与えられる。

【0051】

【数6】

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u0 \\ 0 & \beta & v0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

【0052】ここで、 $(u0, v0)$  は画像中心を表し、 $\alpha (= -f \cdot ku)$ 、 $\beta (= -f \cdot kv / \sin \theta)$  はそれぞれ、 $u$  軸、 $v$  軸のスケール因子を表し、 $\gamma (= f \cdot ku \cdot \cot \theta)$  は2つの軸のねじれを表す。また、行列  $\mathbf{P} = \mathbf{A} \cdot [\mathbf{R}, \mathbf{t}]$  は、空間内の点を画像面に投影する  $3 \times 4$  の投影行列とする。

【0053】以上の記述では、レンズ歪みによる影響を考慮せず、理想的な条件下での変換を示してきた。しかし、実際には歪みによる影響を無視することはできないので、カメラ・パラメータとしてレンズ歪みも加えるものとする。歪み座標の点  $\mathbf{m}_d = [u_d, v_d]^T$  と点  $\mathbf{m} = [u, v]^T$  の関係は、以下に示す式で表すことができる。

【0054】

【数7】

$$\begin{aligned} u &= ud + (ud - cu) \cdot \kappa \cdot rd^2 \\ v &= vd + (vd - cv) \cdot \kappa \cdot rd^2 \end{aligned} \quad (3)$$

【0055】但し、 $rd^2 = (ud - cu)^2 + (vd - cv)^2 \cdot sv^2$  であり、 $(cu, cv)$  は歪み中心を、 $sv$  はアスペクト比をそれぞれ表すものとする。

【0056】続いて、ステレオ法における距離計測方法について説明する。図9に示すように、基準カメラ、検出カメラへの投影行列をそれぞれ  $\mathbf{P}, \mathbf{P}'$  とし、基準画像及び検出画像上のそれぞれの点を  $\mathbf{m}, \mathbf{m}'$  とする。但し、それぞれの画像上の点は、式(3)を用いてひずみの影響は除去されているものとする。

【0057】点  $\mathbf{M}$  までの距離を測定する場合、基準画像上の点  $\mathbf{m}$  に対応する検出画像上の点  $\mathbf{m}'$  を検出する必要がある。点  $\mathbf{m}'$  は、図9に示すように、エピポーラ・ラインと呼ばれる直線上に位置するので(前述)、参照画像上で点  $\mathbf{m}$  に対応する点を検出するためには、この直線上の探索を行えばよいことになる。

【0058】エピポーラ・ラインはカメラ中心と点  $\mathbf{m}$  を

結ぶ直線上の点を検出カメラ上へ投影した点の集合である(前述)。例えば、空間内  $Z$  方向の計測範囲を  $Z0 - Z_n$  とした場合、エピポーラ・ラインは、各距離に対応した点  $\mathbf{M}_i, \mathbf{M}_n$  を投影した点  $\mathbf{m}_i', \mathbf{m}_n'$  を結ぶ直線となる。実際の探索では、距離  $Z_i$  に位置する点を検出画像上に投影して、基準画像上の点との類似度を測り、画像間の点の対応を決定する。

【0059】次いで、基準カメラ上の点  $\mathbf{m}$  へ投影される距離  $Z_i$  の点  $\mathbf{M}_i$  を検出画像上の点  $\mathbf{m}_i'$  へ投影する手順について説明する。点  $\mathbf{m}$  を通る視線上の点は、式(1)を用いて次式のように記述することができる。

【0060】

【数8】

$$\tilde{\mathbf{M}} = s\mathbf{P}^+ \cdot \tilde{\mathbf{m}} + \mathbf{p}^\perp \quad (4)$$

【0061】ここで  $\mathbf{P}^+$  は  $\mathbf{P}$  の擬似逆行列であり、次式で定義される。

【0062】

【数9】

$$\mathbf{P}^+ = \mathbf{P}^T (\mathbf{P}\mathbf{P}^T)^{-1} \quad (5)$$

【0063】また、 $\mathbf{P}^\perp$  は次式を満たすベクトルとなり、常に原点に射影されるため実際には光学中心を示す。但し、 $\omega$  は任意の4次元ベクトルである。

【0064】

【数10】

$$\begin{aligned} \mathbf{P} \cdot \mathbf{p}^\perp &= 0 \\ \mathbf{p}^\perp &= (\mathbf{I} - \mathbf{P}^+ \mathbf{P}) \omega \end{aligned} \quad (6)$$

【0065】式(4)は、光学中心及び基準画像上の点  $\mathbf{m}$  を通るすべての点を表しているが、距離を  $Z_i$  とすることでスケール因子を決定することができ、空間内の点  $\mathbf{M}_i$  を決定することができる。この点を投影行列  $\mathbf{P}'$  により投影すれば、検出画像上の点  $\mathbf{m}_i'$  を算出することが可能となる。

【0066】以上のことから、空間内の点の距離を求めるためには、各カメラのカメラ・パラメータ  $\mathbf{A}, \mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{A}', \mathbf{R}', \mathbf{t}'$  をそれぞれ個々に求めるか、又は、投影行列  $\mathbf{P}, \mathbf{P}'$  を直接算出し、さらに各カメラの歪みパラメータ  $\kappa_1, cu_1, cv_1, sv_1, \kappa_2, cu_2, cv_2, sv_2$  を算出すればよいことになる。

【0067】以下、図面を参照しながら本発明の実施の形態について詳解する。

【0068】図1には、本発明の実施に供されるカメラ・キャリブレーション装置10の機能構成を模式的に示している。該カメラ・キャリブレーション装置10は、既知のパターンの描かれた平面を異なる視点で撮像した画像に基づいて、ステレオ法により距離計測をする際に必要なパラメータを算出することができる装置である。

【0069】基準カメラ1及び検出カメラ2により、既



知のパターンが描かれた平面を撮像する。撮像した濃淡画像はそれぞれ、フレーム・メモリ3及び4にそれぞれ蓄えられる。

【0070】パラメータ算出部5では、異なる視点で撮像した3枚の画像から各カメラの歪みパラメータ、及び、各カメラ1及び2への投影行列を算出して、パラメータ格納部7に算出した値を保存する。

【0071】一方、パラメータ修正部6では、異なる視点で撮像した2枚の画像から、パラメータ格納部7に保存されているパラメータを修正して（但し、修正するためにはパラメータは少なくとも1度は算出されている必要がある）、修正したパラメータをパラメータ格納部7に保存する。パラメータ修正部6での処理は、パラメータ算出部5の処理の一部を用いて実現されている。

【0072】図2には、パラメータ算出部5において実行されるパラメータ算出処理の手順をフローチャートの形式で示している。

【0073】まず、異なる3視点でパターンを描かれた平面を撮像する（ステップS1～S3）。ここで、基準カメラ1及び検出カメラ2での撮像は、同期して行う（又は、同時性が保たれなくても撮像パターンの位置関係などその他の撮影条件が一致する）ことが好ましい。

【0074】撮像の際、平面の空間的な位置（又は視点）に関しては、相対的に平行でなければよい。また、撮像するパターンについても特に制約はないが、以下では白黒2値の格子パターンを用いるものとして各処理の詳細を説明する。

#### 【0075】（1）歪みパラメータの推定（ステップS4）

基準カメラ1及び検出カメラ2の各撮像画像を用いて、各カメラ1及び2の歪みパラメータを推定すると同時に、合成画像への射影変換行列を算出する。

【0076】ここで言う合成画像とは、XYZ座標系において、X-Y平面に平行で且つZ=0の位置に配置さ\*

$$E = \sum_i \left[ \sum_j (I_o(X_o, Y_o) - I_i(ud, vd))^2 \right] \quad (8)$$

【0081】この評価値の最小化に関しては、非線形問題の一般的な解法であるLevenberg-Marquardt法（以下では、単に「L-M法」とする）を適用することができる。例えば、S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery著の“NUMERICAL RECIPES in C” (W. H. Press) には、L-M法について記載されている。

【0082】ここで、歪みパラメータ推定処理の手順をまとめておく。

【0083】1：撮像したパターンに応じて計算機内で合成画像I<sub>0</sub>を作成する。2：各カメラ画像I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub>について、式(3)及び(7)で表される撮像画像と合成画像の関係を使って、式(8)の評価値をL-M法

\*れた仮想平面の次元を落として画像としたものであり、その座標系はXY座標となる。ここで用いる歪みパラメータの推定方法については、例えば本出願人に既に譲渡されている特願平11-161217号明細書に開示されたカメラ・キャリブレーション方法を拡張することで実現される。

【0077】合成画像上の点を $m_o = [X_o, Y_o]^T$ 、撮像画像上の点を $m_i = [u_i, v_i]^T$ 、歪みを除去した画像上の点を $m = [u, v]^T$ とすると、各点の関係は図3に示すように、射影変換行列H<sub>i</sub>と歪みパラメータ(κ, c<sub>u</sub>, c<sub>v</sub>, s<sub>v</sub>)により表すことができる。つまり、撮像画像上の点m<sub>i</sub>を式(3)を用いてmへ変換し、さらに次式により変換することで合成画像上の点m<sub>o</sub>に関連つけられる。

【0078】

【数11】

$$\tilde{m}_o = H_o \cdot \tilde{m} \quad (7)$$

【0079】上式に示す関係に基づいて、図4に示すように、撮像した画像を同一の合成画像合わせ込み(Image Registration)を行なうことで、パラメータ推定を行うことができる。この場合、推定するパラメータは、歪みパラメータ(4パラメータ)と、各撮像画像I<sub>i</sub>から合成画像I<sub>0</sub>への射影変換行列H<sub>i</sub>(8パラメータ)があり、合計28個のパラメータとなる。評価値としては、次式に示すように合成画像I<sub>0</sub>と撮像画像I<sub>i</sub>の2乗和を最小化することで、各パラメータを推定する。但し、i=1, 2, 3は画像枚数を表す。この処理により、例えばパターンが撮像された位置が、図4に示すように局所的であっても、比較的安定に歪みパラメータを推定することが可能となる。

【0080】

【数12】

により最小化し、歪みパラメータκ, c<sub>u</sub>, c<sub>v</sub>, s<sub>v</sub>、及び、各画像から合成画像への射影変換行列H<sub>o</sub>, H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>を算出する。

#### 【0084】（2）内部パラメータの推定（ステップS5）

先の歪みパラメータ推定の際に使用した仮想平面と撮像画像の関係を上式(1)により書き直すと次式のようになる。

【0085】

【数13】

$$sm = A \begin{bmatrix} r1 & r2 & r3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

【0086】但し、 $R = [r1, r2, r3]$ としている。上式(9)と先述の式(7)より次式を導くことができる。

【0087】

【数14】

$$H = H_0^{-1} = A \begin{bmatrix} r1 & r2 & t \end{bmatrix} \quad (10)$$

【0088】さらに $H = [h1, h2, h3]$ とすると、上式(10)から次式を得ることができる。

【0089】

【数15】

$$\begin{bmatrix} h1 & h2 & h3 \end{bmatrix} = \lambda A \begin{bmatrix} r1 & r2 & t \end{bmatrix} \quad (11)$$

【0090】但し、 $\lambda$ はスケール因子である。 $r1$ と $r2$ は正規直交、すなわち $\langle r1, r2 \rangle = 0$ 且つ $|r1| = |r2| = 1$ であることを利用すると、上式(12)から次式の関係式を導くことができる。

【0091】

【数16】

$$h1^T B h2 = 0$$

$$h1^T B h1 = h2^T B h2 \quad (12)$$

【0092】但し、 $B = A^{-T} A^{-1}$ とする。上式(12)において、 $B$ は対称行列であり、次式のように表される。

【0093】

【数17】

$$B = \begin{bmatrix} B11 & B12 & B13 \\ B12 & B22 & B23 \\ B13 & B23 & B33 \end{bmatrix}$$

【0094】ここで列ベクトル $b = [B11, B12, B22, B13, B23, B33]^T$ とし、 $H$ の列ベクトルを $h_i = [h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ とすると、次式を得ることができる。但し、 $v_{ij} = [h_{i1} h_{j1}, h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1}, h_{i2} h_{j2}, h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3}, h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3}, h_{i3} h_{j3}]^T$ とする。

【0095】

【数18】

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad (13)$$

【0096】式(13)を式(12)に代入することによって、上記の列ベクトル $b$ に関する以下の方程式を得ることができる。

【0097】

【数19】

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (14)$$

【0098】上式(14)は1枚の撮像平面(射影変換行列)から得られる式であるから、すべての撮像画像について式(14)を作成することで最終的に次式が得られ、これを解くことで、列ベクトル $b$ を求めることが可能となる。

【0099】

【数20】

$$Vb = 0 \quad (15)$$

【0100】但し、 $V$ は以下の通りとする。

【0101】

【数21】

$$V = \begin{bmatrix} v1_{12}^T \\ (v1_{11} - v1_{22})^T \\ v2_{12}^T \\ (v2_{11} - v2_{22})^T \\ v3_{12}^T \\ (v3_{11} - v3_{22})^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

【0102】上式(15)によりベクトル $b$ を算出することができれば、内部パラメータの各要素は次式から算出可能となる。

【0103】

【数22】

$$v0 = (B12B13 - B11B23) / (B11B22 - B12^2)$$

$$\lambda = B33 - [B13^2 + v0(B12B13 - B11B23)] / B11$$

$$\alpha = \sqrt{\lambda / B11}$$

$$\beta = \sqrt{\lambda \cdot B11 / (B11B22 - B12^2)}$$

$$\gamma = -B12\alpha^2\beta / \lambda$$

$$u0 = \gamma \cdot v0 / \alpha - B13\alpha^2 / \lambda \quad (17)$$

【0104】ここで、基準カメラの内部パラメータ推定処理の手順をまとめておく。

【0105】1: 合成画像への射影変換行列の逆行列 $H_i = H_{0i}^{-1}$ を算出する。

2: 各逆行列 $H_i$ から式(14)の関係式を算出する。

3: すべての行列 $H_i$ を使って得られた式(15)を解き、式(17)から内部パラメータの各要素値を算出する。

【0106】(3) 平面の位置推定 (ステップS6)

続いて、先に算出した基準カメラの内部パラメータを利用して、撮像した平面の空間内での位置及び姿勢を推定する。

【0107】歪みパラメータ算出の際、同時に算出した

各画像から合成画像への射影変換行列 $H_i$ の逆行列を用いることにより撮像画像の格子点を抽出することができる。すなわち、合成画像中の任意の格子点（合成画像は作成されたものであり、その位置は既知である）を行列 $H_i^{-1}$ により射影することで、歪みを除去した画像上での格子点 $m = [u, v]^T$ を算出することができる。

【0108】図5に示すように、歪みを除去した画像上での格子点 $m$ と仮想平面上の点 $M_o = [X, Y, O]^T$ の関係は、仮想平面を空間内で回転並びに移動し、基準カメラ1への投影行列 $P$ により基準カメラの撮像平面に投影されたものとなる。仮想平面の空間内での回転及び移動を行列 $[Rw \ tw]$ とすると、点 $m$ と点 $M_o$ の関係は次式のように表される。

【0109】

【数23】

$$\tilde{m} = P \cdot D \cdot \tilde{M}_o \quad (18)$$

【0110】但し、上式(19)において、行列 $D$ は以下の通りとする。

【0111】

$$[Rw \ tw] = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_1 \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & t_1 \\ \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 - \sin\theta_1 \cos\theta_3 & \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 + \cos\theta_1 \cos\theta_3 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 & t_2 \\ \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 + \sin\theta_1 \sin\theta_3 & \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_3 & \cos\theta_2 \cos\theta_3 & t_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

【0117】また、投影行列 $P$ の算出は、先に算出した内部パラメータ $A$ と測定範囲に応じて値を決定した外部パラメータを用いて行うことができる。例えば、基準カメラ1のカメラ位置を $C_o = [x_c, y_c, z_c]^T$ とした場合、投影行列 $P$ は次式(21)を用いて算出することができる。

【0118】

【数27】

$$P = A \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_c \\ 0 & 1 & 0 & y_c \\ 0 & 0 & 1 & z_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

【0119】上式(20)で示した6個のパラメータ $t_r = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, t_x, t_y, t_z]$ の推定は、次式を評価値として、L-M法(前述)により行うことができる。

【0120】

【数28】

$$E = \sum_j (m_j - \tilde{m}_j)^2 \quad (22)$$

【0121】上式(22)は、基準カメラ1の撮像画像上の格子点 $m_j$ と上式(18)により投影された点との差分の二乗の総和を表す。上式(22)による推定を各撮像平面に施すことで、仮想平面の空間内での回転及び移動パラメータ $Rw_1, Rw_2, Rw_3, tw_1, tw_2, tw_3$ を得ることができる。

\*【数24】

$$D = \begin{bmatrix} Rw & tw \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

【0112】式(18)を変形すると、以下の式が導かれる。

【0113】

【数25】

$$\tilde{M} = D \tilde{M}_o$$

【0114】点 $M$ は撮像平面上の点の空間座標となるので、行列 $[Rw \ tw]$ を推定することで、平面位置を決定することができ、さらには撮像平面上の格子点の空間座標を算出することができる。

【0115】行列 $[Rw \ tw]$ は、下式(20)に示すように、各軸周りの回転角 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 、及び、並進 $(t_x, t_y, t_z)$ の合計6自由度である。

【0116】

【数26】

2.  $tw_3$ を得ることができる。

【0122】(4) 検出カメラへの投影行列の算出(ステップS7)

先に算出した仮想平面の空間内での回転及び移動パラメータ $Rw_1, Rw_2, Rw_3, tw_1, tw_2, tw_3$ を用いると、検出カメラ上の点 $m'_i = [u'_i, v'_i]^T$ と仮想平面上の点 $D_i$ により変換した撮像平面上の点 $M_i = [X_i, Y_i, Z_i]^T$ の関係は先述の式(1)を満たす。該式に基づいて、さらに次式を得ることができる。

【0123】

【数29】

$$\begin{bmatrix} v_{11} \\ v_{21} \\ v_{12} \\ v_{22} \\ v_{13} \\ v_{23} \end{bmatrix} p' = 0 \quad (23)$$

【0124】但し、 $v_{11}$ 並びに $v_{21}$ は次式(24)を満たすものとし、また、ベクトル $p'$ は検出カメラ2への投影行列 $P'$ の各要素を次々式(25)に示すようにベクトルで表したものであるとする。

【0125】

【数30】

$$\begin{aligned} \mathbf{v1i} &= [X_i \ Y_i \ Z_i \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -u^1 X_i \ -u^1 Y_i \ -u^1 Z_i \ -u^1] \\ \mathbf{v2i} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ X_i \ Y_i \ Z_i \ 1 \ -v^1 X_i \ -v^1 Y_i \ -v^1 Z_i \ -v^1] \end{aligned} \quad (24)$$

【0126】

$$\mathbf{p}' = [p11, p12, p13, p21, p22, p23, p31, p32, p33]^T \quad (25)$$

【0127】上式(23)を解くことで、検出カメラへの投影行列 $\mathbf{P}'$ を得ることができる。

【0128】(5)パラメータの最適化(ステップS8)

最後に、これまでの処理ステップで算出した各パラメータ $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{Rw1}$ ,  $\mathbf{Rw2}$ ,  $\mathbf{Rw3}$ ,  $\mathbf{tw1}$ ,  $\mathbf{tw2}$ ,  $\mathbf{tw3}$ ,  $\mathbf{P}'$ の各々について、基準カメラ1、検出カメラ2で撮像したすべての画像を用いることで、最適化処理を※

※施す。

【0129】評価式は次式(26)で与えられるものと

し、L-M法(前述)により解くことができる。但し、

10  $i=1, 2, 3$ は画像番号であり、 $j=1, 2, \dots, n$

は画像上の点数を表す。また、式(26)中の各点は、それぞれ式(27)によって投影された点を表す。

【0130】

【数32】

$$E = \sum_i \sum_j ((m_{ij} - \hat{m}_{ij})^2 + (m'_{ij} - \hat{m}'_{ij})^2) \quad (26)$$

$$\tilde{\mathbf{m}}_{ij} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \begin{bmatrix} \mathbf{Rw}_i & \mathbf{tw}_i \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{m}}'_{ij} = \mathbf{P}' \begin{bmatrix} \mathbf{Rw}_i & \mathbf{tw}_i \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

【0131】但し、行列 $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ は基準カメラ1のカメラ位置を示す外部パラメータであり、前述したように 30 計測範囲により決定される。

【0132】図6には、パラメータ修正処理の手順をフローチャートの形式で示している。

【0133】パラメータ修正処理では、異なる2つの視点で所定のパターンの描かれた平面を撮像する(ステップS11~S12)。ここでは、基準カメラ1及び検出カメラ2での撮像は同期して行う(又は、同時性が保たれなくてもパターンの位置関係などその他の撮影条件が一致する)。撮像の際、平面の空間的な位置(又は視点) 40 に関しての制約はなく、撮像パターンについても特に制約はない。以下では、パターンは白黒2値の格子パターンを用いるものとして各処理の詳細を説明することにする。

【0134】また、パラメータ修正処理では、カメラの内部パラメータに変化はなく、カメラ間の位置関係のみが変化した場合を前提とする。このような場合、位置関係が変化後の基準カメラ1の位置を基に座標系を考えれば、検出カメラ2の位置変化のみが生じたものとして扱うことが可能である。つまり、修正が必要となるパラメータは、空間内の点を検出カメラ2へ投影する $3 \times 4$ の 50

投影行列 $\mathbf{P}'$ のみとなり、歪みパラメータや基準カメラ1の内部パラメータを固定値として処理を行う。

【0135】次いで、ステップS13では、各カメラ1及び2で撮像した画像から合成画像への射影変換行列 $\mathbf{H}_{ob1}$ ,  $\mathbf{H}_{ob2}$ ,  $\mathbf{H}_{od1}$ ,  $\mathbf{H}_{od2}$ を算出する。実際の処理は、前述した「(1)歪みパラメータ推定」の処理に準じて行われるが、ここでは歪みパラメータの推定は行わない。

【0136】続いて、前回のキャリブレーションにより算出したパラメータから、基準カメラ1の内部パラメータ $\mathbf{A}$ を読み込む(ステップS14)。この内部パラメータを用いて、次ステップS15では撮像平面の位置推定を行う(前述の「(3)平面の位置推定」を参照のこと)。

【0137】次いで、ステップS15において推定した平面パラメータ $\mathbf{Rw1}$ ,  $\mathbf{Rw2}$ ,  $\mathbf{tw1}$ ,  $\mathbf{tw2}$ を用いて、検出カメラ2への投影行列 $\mathbf{P}'$ を算出する(ステップS16)。このステップS16は、パラメータ格納部7に保存されている投影行列を用いることで処理を省略することも可能である。但し、カメラの位置関係の変化が大きい場合には、次の最適化処理において、そのずれを吸収するに多くの時間を有することになるか、又は吸

収ができないことがあるので、最適化処理の収束時間を短縮する意味でも、ステップS16を実行することが好ましい。

【0138】最後に、パラメータ $Rw1$ ,  $Rw2$ ,  $tw1$ ,  $tw2$ ,  $P'$ を、基準カメラ1及び検出カメラ2で撮像したすべての画像を用いて最適化する(ステップS17)。このステップでの評価値は上記の式(26)で与えられるものとし(但し、使用する画像数は2とする)、また、式(26)中の各点はそれぞれ式(27)によって投影されるものとする。

【0139】〔追補〕以上、特定の実施例を参照しながら、本発明について詳解してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施例の修正や代用を成し得ることは自明である。すなわち、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、限定的に解釈されるべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の欄を参酌すべきである。

【0140】

【発明の効果】以上詳記したように、本発明によれば、カメラの特性を表すパラメータを算出することができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することができる。

【0141】また、本発明によれば、平面上の既知パターンを異なる方向からカメラで撮像するだけで、平面の位置に関する拘束のない、ステレオ・システムにおけるカメラ・キャリブレーションを簡単に行なうことができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することができる。

【0142】本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法によれば、空間的な位置拘束のない任意平面を用いて、ステレオ法における簡単なカメラ・キャリブレーションを行なうことができる。したがって、撮像平面の位置関係に制約がないので、専用の器具を必要としない。

【0143】また、データ撮像は、例えばプリンタなどでパターン出力した紙を貼りつけた壁やプレートを動かすか、又は、カメラを移動すればよいので、キャリブレーション作業の準備を簡単に行なうことができる。

【0144】また、合成画像への画像全体を合わせ込むことによって歪みパラメータ推定や格子点抽出を行なっているので、比較的安定に推定及び抽出を行なうことができる。

【0145】また、撮像したすべての画像から歪みパラメータを推定しているので、対象が小さく画像ないの一部にしか撮像されていない場合でも、比較的安定にパラメータ推定を行なうことができる。

【0146】例えば、歪みの影響を無視し、格子点の抽

出を行い、最後に歪みパラメータを加えて最適化するような場合、歪曲収差の大きいレンズを使用した場合には各パラメータの推定をうまく行うことができない可能性がある。これに対し、本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法によれば、格子点抽出と同時に歪みパラメータ推定を行うことができるので、歪曲収差の大きいレンズの場合でも安定してパラメータ推定を行うことができる。

【0147】また、本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法によれば、一度算出したパラメータを修正することが可能である。このような場合、異なる2つの視点で撮像画像を用いて行うことができるので、データ準備が容易である。

【0148】また、本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法では、既知パターンを用いてキャリブレーションを行っているため、処理の安定性を増すことができる。

【0149】

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施に供されるカメラ・キャリブレーション10の機能構成を模式的に示した図である。

【図2】パラメータ算出部5において実行されるパラメータ算出処理の手順を示したフローチャートである。

【図3】合成画像上の点 $m_s = [X_s, Y_s]^T$ 、撮像画像上の点 $m_d = [u_d, v_d]^T$ 、及び、歪みを除去した画像上の点 $m = [u, v]^T$ の関係を示した図である。

【図4】撮像した画像を同一の合成画像合わせ込み(Image Registration)を行なう様子を描写した図である。

【図5】歪みを除去した画像上での格子点 $m$ と仮想平面上の点 $M_s = [X, Y, O]^T$ の関係を描写した図である。

【図6】パラメータ修正処理の手順を示したフローチャートである。

【図7】撮像対象に対する基準カメラと検出カメラの配置を模式的に示した図である。

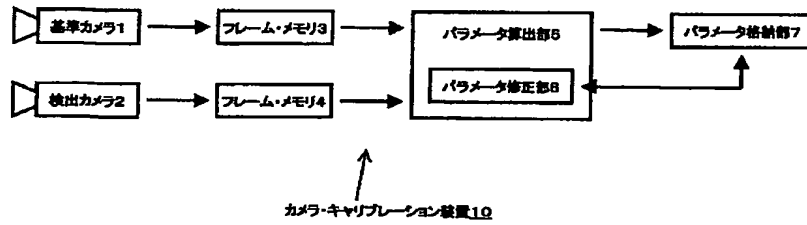
【図8】略正方形のパターンを基準カメラと検出カメラの各々によって撮像した画像を示した図である。

【図9】エッジ・ラインと、参照画像中における観察点 $m'$ の様子を図解したものである。

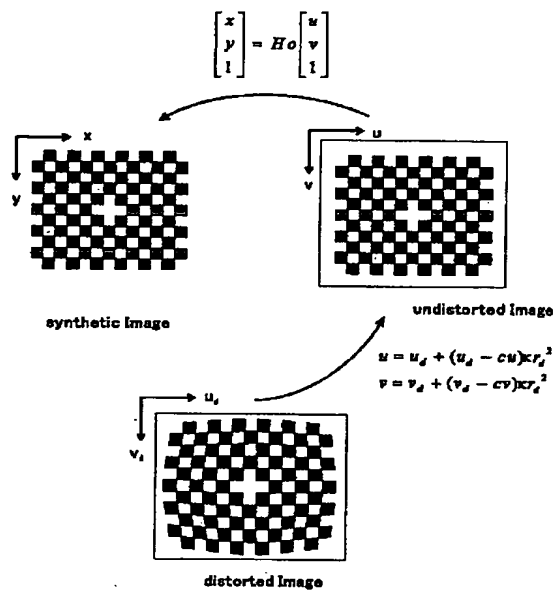
【符号の説明】

- 1…基準カメラ
- 2…検出カメラ
- 3, 4…フレーム・メモリ
- 5…パラメータ算出部
- 6…パラメータ修正部
- 7…パラメータ格納部
- 10…カメラ・キャリブレーション装置

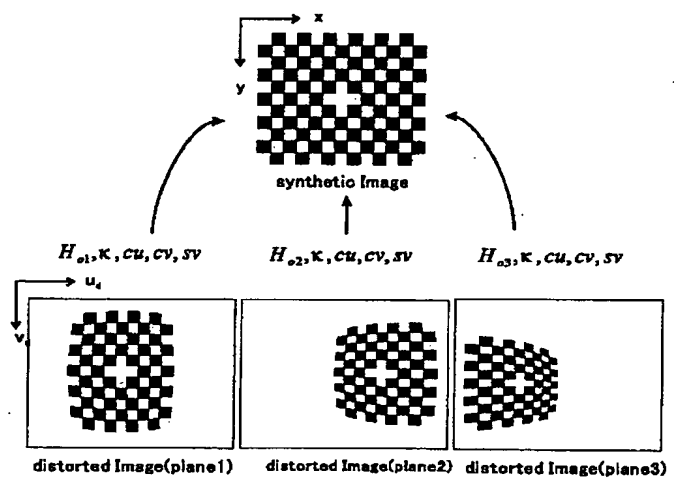
【図1】



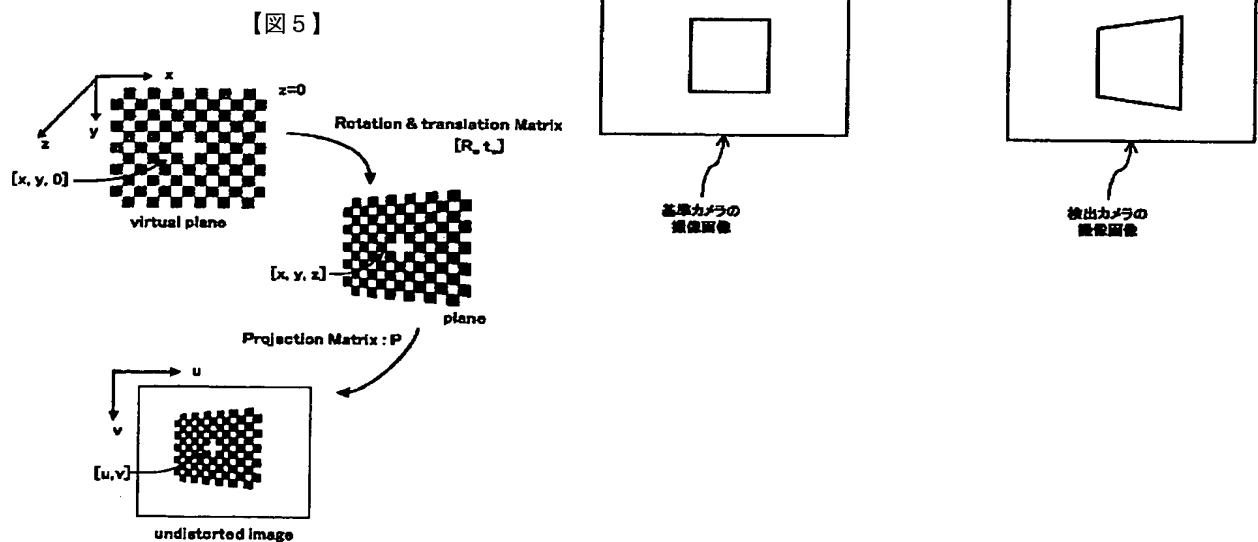
【図3】



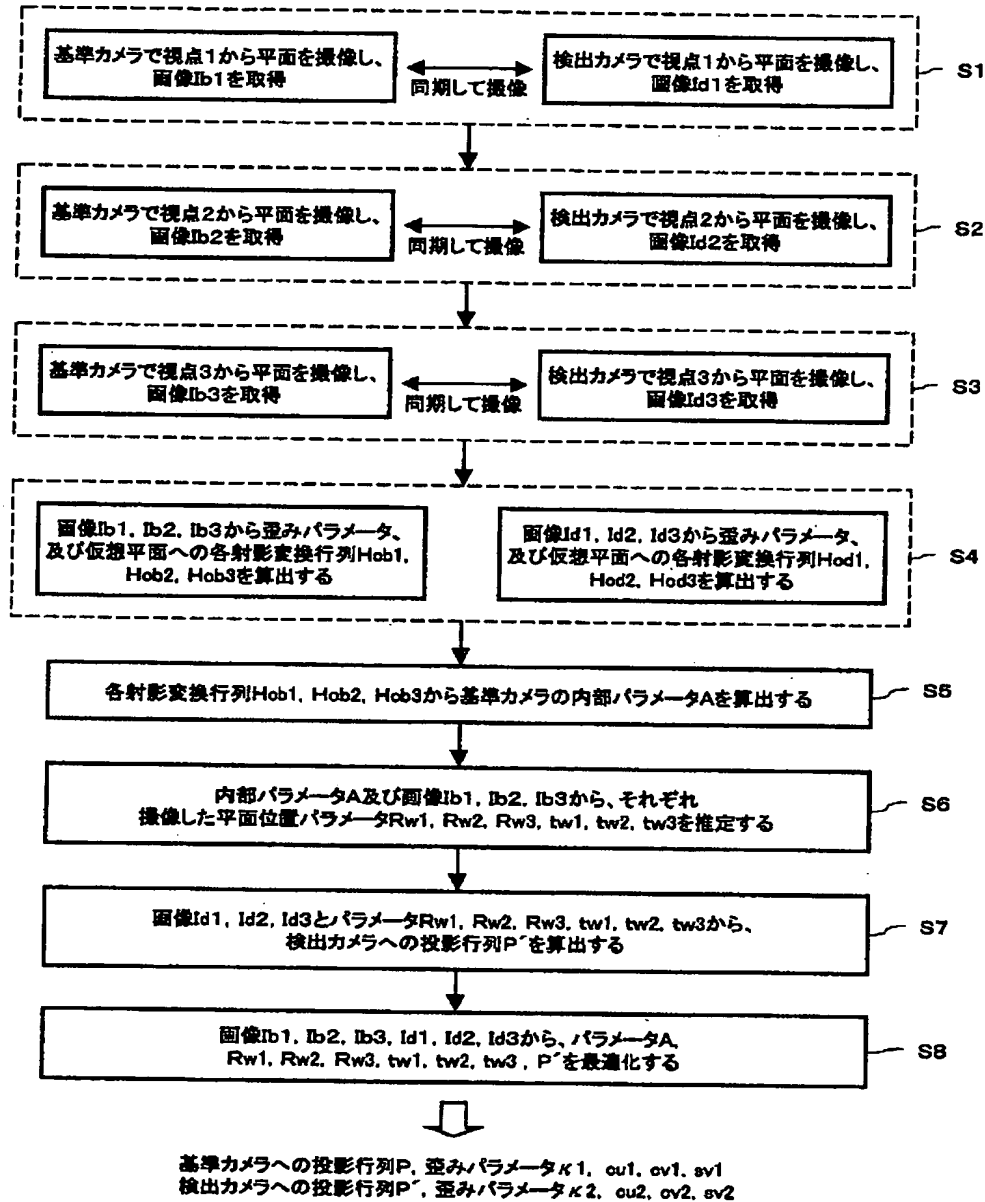
【図4】



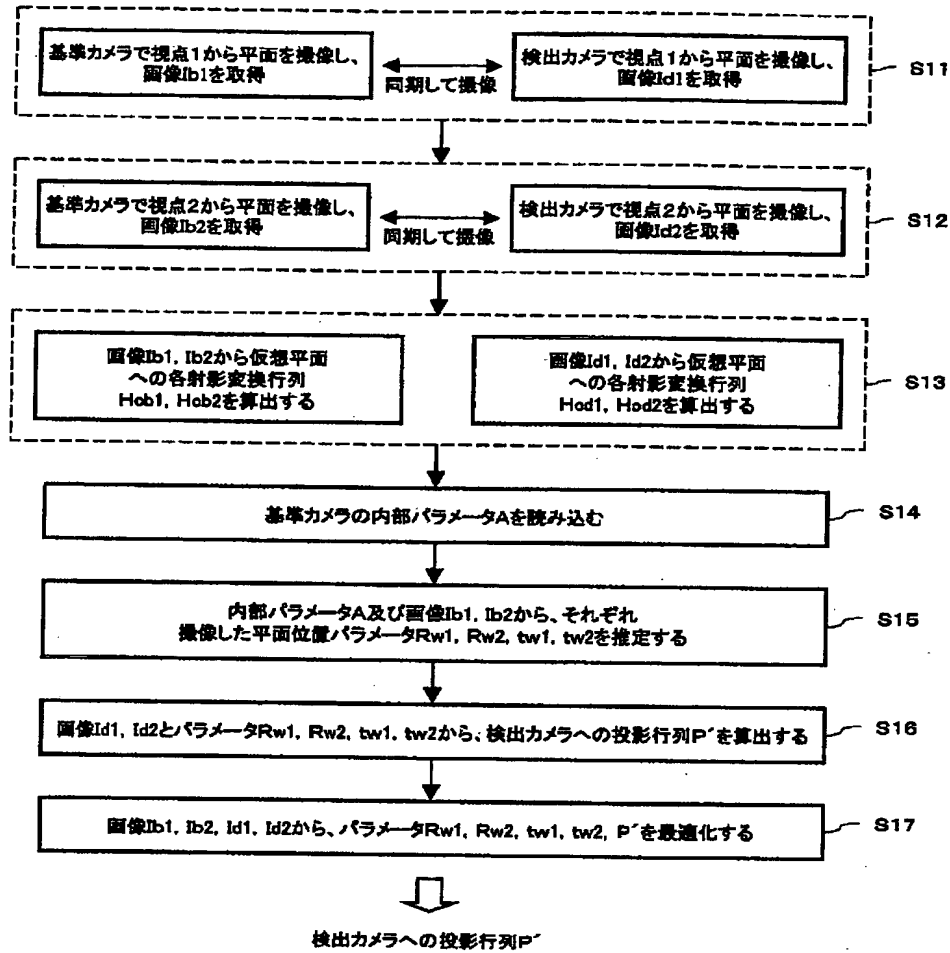
【図8】



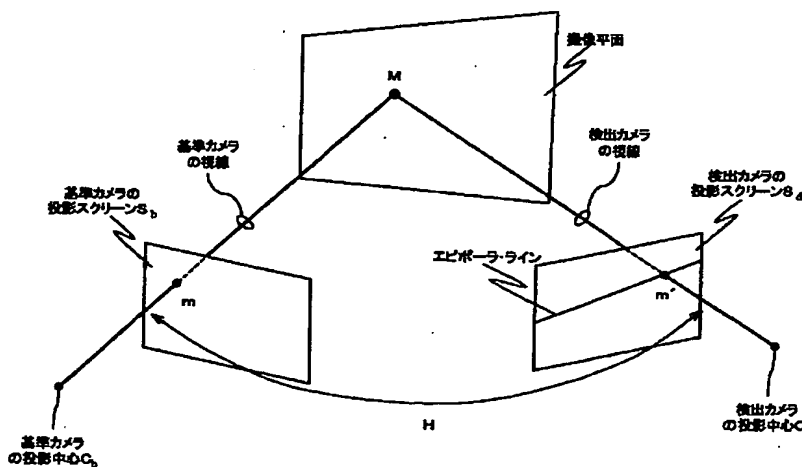
【図2】



【図6】

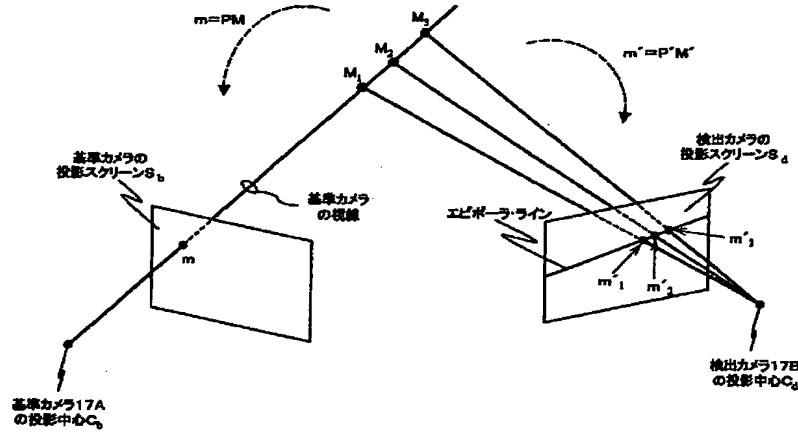


【図7】





【図9】



## 【手続補正書】

【提出日】平成13年7月12日(2001. 7. 12)

\* 【補正方法】変更

【補正内容】

## 【手続補正1】

【0116】

【補正対象書類名】明細書

【数26】

【補正対象項目名】0116

\*

$$[Rw \ tw] = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_2 & \sin\theta_1 \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & tx \\ \cos\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 - \sin\theta_1 \cos\theta_3 & \sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin\theta_3 + \cos\theta_1 \cos\theta_3 & \cos\theta_2 \sin\theta_3 & ty \\ \cos\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 + \sin\theta_1 \sin\theta_3 & \sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos\theta_3 - \cos\theta_1 \sin\theta_3 & \cos\theta_2 \cos\theta_3 & tz \end{bmatrix} \quad (20)$$

## 【手続補正2】

※ 【補正内容】

【補正対象書類名】明細書

【0126】

【補正対象項目名】0126

【数31】

【補正方法】変更

※

$$p' = [p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{31}, p_{32}, p_{33}, p_{34}]^T \quad (25)$$

フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA04 FF05 FF61 QQ24 QQ31  
 UU05  
 2F112 AC03 AC06 BA01 CA02 CA12  
 FA03 FA21 FA41 FA45  
 5C061 BB11 BB15 CC01